

ПОВЕРХНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ОБЛУЧАЕМЫХ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СИЛЬНОТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ: МОРФОЛОГИЯ И ТОПОГРАФИЯ

А.Б. Марков^{1, 3)}, Л.Л. Мейснер²⁾, С.Н. Мейснер²⁾, Е.В. Яковлев³⁾, Е.Ю. Гудимова²⁾, В.И. Петров³⁾

¹⁾Томский научный центр СО РАН,

пр. Академический 10/4, Томск, 634055, Россия, a.markov@hq.tsc.ru

²⁾Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

пр. Академический 2/4, Томск, 634055, Россия, llt@ispms.tsc.ru

³⁾Институт сильноточной электроники СО РАН,

пр. Академический 2/3, Томск, 634055, Россия, yakovlev@lve.hcei.tsc.ru, petrov@lve.hcei.tsc.ru

Проведено исследование кратерообразования на поверхностях металлических материалов – нержавеющей стали 316L и никелида титана при облучении низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком микросекундной длительности. Установлено, что кратеры образуются в областях измененного химического состава, т.е. в областях расположения включений. Для стали такими включениями являются включения сульфида марганца MnS, для никелида титана – окси-карбиды титана. Исследования при повышенных начальных температурах показали, что количество кратеров уменьшается с увеличением температуры. Последнее свидетельствует о гомогенизации поверхности, связанной с образованием включений в матрице при ее облучении.

Введение

Поверхность материала является важнейшим понятием в физике конденсированной среды и сейчас на нее обращается большое внимание как в научных, так и в прикладных исследованиях. При взаимодействии поверхности с окружающей средой в приповерхностных слоях протекают интересные физические явления, а от ее состояния зависят многочисленные свойства изделия, такие как коррозионная стойкость, износостойкость, электрическая прочность и другие. Импульсные электронные пучки являются эффективным инструментом модификации поверхности, а взаимодействие импульсных электронных пучков с поверхностью, как правило, приводит к сглаживанию и гомогенизации последней. Кроме того, в результате облучения в приповерхностном слое могут происходить фазовые превращения и его наноструктурирование. Все это во многих случаях улучшает эксплуатационные характеристики изделий. Однако формирующиеся при облучении импульсным электронным пучком кратеры на поверхности могут свести на нет весь полученный положительный эффект. В настоящей работе проведены предварительные исследования, позволяющие улучшить наше понимание природы кратерообразования.

Основная часть

В исследованиях использовали образцы из аустенитной нержавеющей стали 316L диаметром 12.6 и толщиной 3 мм. Химический состав стали был следующий (ат.%): 0.03% C, 16%-18% Cr, 10%-14% Ni, 2% Mn, 2-3% Mo, 0.75% Si, 0.05% P, 0.03% S, основа Fe. Еще одним материалом для исследований был никелид титана. Образцы из TiNi сплава (поставщик – МАТЭКС, Россия) размерами 10x10x1 мм были вырезаны из листового проката толщиной 1.3 мм методом электроэрозионной резки. Химический состав сплава (ат.%): 50.0% Ti, 49.5% Ni, 0.5% C, 0.03% O, 0.002% N. В исходном состоянии в образцах каждого типа содержались включения, обусловленные технологией их производства. Для стали – это

включения сульфида марганца MnS с характерным размером ~1 мкм, для никелида титана такими включениями являлись окси-карбиды титана нестехиометрических составов $Ti_x(O,C)_y$, размер которых колебался в интервале 1-5 мкм.

Обработка проводилась на электронно-пучковой машине «РИТМ-СП», генерирующей низкоэнергетический сильноточный электронный пучок (НСЭП) со следующими параметрами: длительность импульса – 3-5 микросекунд; энергия электронов – 15-25 кэВ; ток пучка – до 25 кА [1-2]. Образцы никелида титана облучались при комнатной температуре, а образцы из нержавеющей стали 316L – не только при комнатной, а и при повышенных температурах 670 и 870 К.

Облученные образцы исследовались методами оптической и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) во вторичных и обратно отраженных электронах. Кроме того, проводилось исследование химического состава в локальных областях поверхности облученных материалов.

На рис. 1 и 2 приведены СЭМ изображения поверхности нержавеющей стали, облученной НСЭП при комнатной температуре во вторичных и обратно отраженных электронах, соответственно. Видно большое количество сформированных на поверхности кратеров. Кратер является геометрической неоднородностью поверхности. Следовательно, определенная неоднородность должна быть заложена и в исходном материале.

Из рис. 2 видно, что вокруг каждого кратера присутствует большое темное пятно, что свидетельствует об измененном химическом составе в этих областях относительно основы. Таким образом, из сопоставления рисунков 1 и 2 понятно, что кратеры возникают не в любых областях, а в областях с измененным химическим составом, т.е. в тех областях, где присутствуют включения.

Дополнительные исследования показали, что на поверхности стали местами возникновения кратеров являются места расположения включений сульфида марганца. В принципе, аналогичные результаты были получены в работе наших китайских коллег [3]. Однако, в их работах утвер-

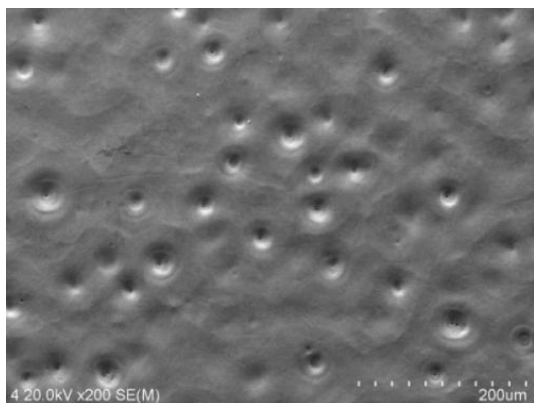


Рис. 1. СЭМ изображение поверхности нержавеющей стали 316L во вторичных электронах, облученной при комнатной температуре.

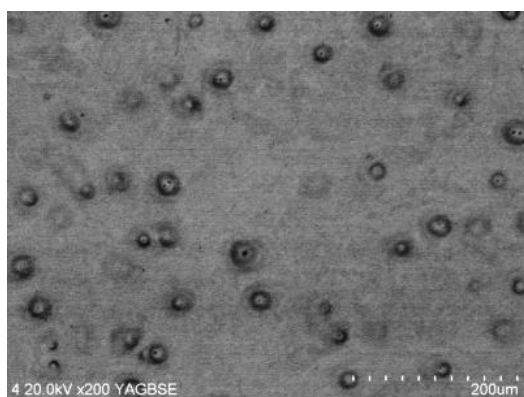


Рис. 2. СЭМ изображение поверхности нержавеющей стали 316L в обратно отраженных электронах, облученной при комнатной температуре.

ждалось, что механизм гомогенизации поверхности происходит в результате взрыва перегретых включений. По нашим данным, механизм кратерообразования – это обычная термокапиллярная конвекция, связанная с изменением поверхностного натяжения в локальных областях в результате перегрева включений, а к гомогенизации поверхности приводит их растворение (а не взрыв) в окружающей матрице. Об это свидетельствуют данные, полученные при облучении стальных образцов при повышенных температурах. Действительно, при повышении начальной температуры происходит увеличение толщины расплава и времени его жизни, в то время, как перегрев включений относительно матрицы практически не меняется. Тем не менее, количество кратеров при начальной температуре 670 К становится меньше, а при 870 К они практически отсутствуют.

Исследования по кратерообразованию были проведены и на образцах из никелида титана. На рис. 3 и 4 приведены СЭМ изображения исходной и облученной поверхностей. По данным локального микроанализа химический состав темных частиц на дне микрократеров практически совпадает с химическим составом исходных частиц. Это однозначно свидетельствует о том, что кратеры в исследуемом материале формируются на

включениях окси-карбида титана нестехиометрического состава $Ti_x(O,C)_y$. Действительно, на исходной поверхности химический состав включений – это, главным образом, титан с присутствием небольшого количества углерода и кислорода. Никель в этой области отсутствует. После облучения мы наблюдаем подобный состав в центре сформированного кратера. Связано это с тем, что облучение в этом случае было однократным при небольшой плотности энергии и включение не успело целиком раствориться в окружающей матрице. Полученный результат весьма важен, поскольку он дополняет известные из литературы данные о том, что кратерообразование в никелиде титана происходит на включениях Ti_2Ni [4].

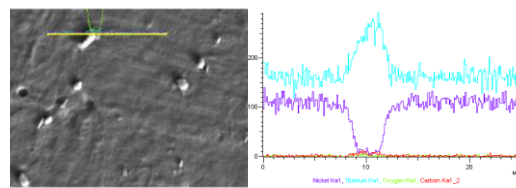


Рис. 3. СЭМ изображение поверхности исходного никелида титана в обратно отраженных электронах. Справа – данные линейного микроанализа химического состава.

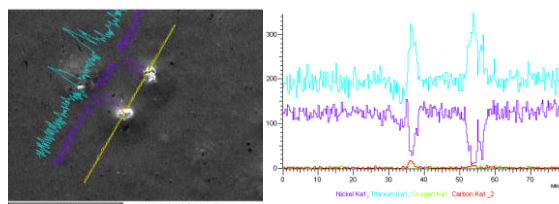


Рис. 4. СЭМ изображение поверхности облученного никелида титана в обратно отраженных электронах. Справа – данные линейного микроанализа химического состава.

Закключение

В работе проведено исследование кратерообразования на поверхностях металлических материалов – нержавеющей стали 316L и никелида титана при облучении НСЭП. Установлено, что кратеры образуются в областях измененного химического состава, т.е. в областях расположения включений. Для стали такими включениями являются включения сульфида марганца MnS с характерным размером ~ 1 мкм, для никелида титана такими включениями являются окси-карбида титана нестехиометрических составов $Ti_x(O,C)_y$, размер которых изменяется в интервале 1-5 мкм. Последний результат весьма важен, поскольку он дополняет известные из литературы данные о том, что кратерообразование в никелиде титана происходит на включениях Ti_2Ni . Исследования при повышенных начальных температурах показали, что количество кратеров в стали уменьшается с увеличением температуры. Это свидетельствует о том, что гомогенизация по-

верхности связана с растворением включений в матрице при ее облучении.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-13-00023).

2. Markov . A.B., Mikov A.V., Ozur G.E., et al. // ПТЭ. 2011. V. 54. № 6. P. 122–126.

3. Zhang K., Zou J., Grosdidier T., et al. // Surf. Coat. Technol. 2006. V. 201. P. 1393–1400.

4. Zou J., Zhang K., Dong C., et al. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 041913

Список литературы

1. Markov . A.B., Yakovlev E.V., Petrov V. I. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2013, V. 41. Issue 8. Part 2. P. 2177-2182.

SURFACE OF METALLIC MATERIALS IRRADIATED BY A LOW-ENERGY, HIGH-CURRENT ELECTRON BEAM: MORPHOLOGY AND TOPOGRAPHY

Alexey Markov^{1, 3)}, Ludmila Meisner²⁾, Stanislav Meisner²⁾, Evgenii Yakovlev³⁾, Ekaterina Gudimova²⁾, Vsevolod Petrov³⁾

¹⁾Tomsk Scientific Center SB RAS,

Akademicheskii pr., 10/4, Tomsk, 634055, Russia, a.markov@hq.tsc.ru

²⁾Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS,

Akademicheskii pr., 2/4, Tomsk, 634055, Russia, llm@ispms.tsc.ru

³⁾Institute of High Current Electronics SB RAS,

Akademicheskii pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia, yakovlev@lve.hcei.tsc.ru, petrov@lve.hcei.tsc.ru

Investigation of crater formation on the surface of metallic materials, namely, 316L stainless steel and titanium nickelide irradiated with a low-energy, high-current electron beam of microsecond duration has been carried out. It has been established that the craters are formed in the local areas of changed chemical composition, i.e., at the sites of location of inclusions. For stainless steel such inclusions are inclusions of manganese sulphide MnS, and for NiTi such inclusions are oxy-carbides of titanium. Studies at elevated initial temperatures showed that the number of craters decreases with increasing temperature. The latter evidences that homogenization of the surface during irradiation is associated with the dissolution of inclusions in a surrounded material.